

Ingeniería de estructuras

TRABAJO DE CURSO

S28: DIMENSIONAMIENTO Y CÁLCULO DE UNA PRESA DE
HORMIGÓN

Guillermo Bozzo Fernández

47966310-V

Contenido

1. Introducción	3
2. Análisis 2D	4
2.1. Pre-proceso	4
2.1.1. Geometría y condiciones de contorno	4
2.1.2. Cargas actuantes	5
2.1.3. Mallado.....	5
2.2. Post.-proceso.....	6
2.2.1. Primer caso de cargas: Peso propio	6
2.2.2. Segundo caso de carga: Peso propio + Acción del agua (empuje hidrostático).....	8
2.3. Conclusiones.....	9
3. Análisis 3D	10
3.1. Preámbulo	10
3.2. Pre-proceso	10
3.2.1. Geometría y condiciones de contorno	10
3.2.2. Cargas actuantes	11
3.2.3. Mallado.....	11
3.3. Post-proceso.....	11
3.3.1. Primer caso: Peso propio	11
3.3.2. Segundo caso: Peso propio + Acción del agua (empuje hidrostático)	13
4. Conclusiones.....	15

1. Introducción

El objetivo de este ejercicio es dimensionar y calcular una presa de hormigón de 48 metros de altura en primer lugar simplificando el problema con una transformación a 2D y, posteriormente verificando los resultados con el análisis 3D. Para ello se hará uso de una discretización del problema mediante el uso de distintas mallas y se calculará numéricamente gracias al método de los elementos finitos.

Ya que la presa es suficientemente larga y no se le aplica ningún tipo de carga puntual es decir, todas las cargas se hallan repartidas a lo largo de toda la longitud, podemos tratar el problema 2D como un problema de deformación plana. De esta forma se trabajará en el plano XY ya que asumiremos que todas las secciones perpendiculares al eje Z (longitudinal) tienen la misma deformación. El PTV para este tipo de problemas es el siguiente:

$$\iint_A \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} t dA = \iint_A \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} t dA + \int_1 \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} t dl + \sum_{i=1}^n \delta \mathbf{u}_i^T \mathbf{p}_i$$

Este PTV se trata numéricamente con el programa GiD mediante el apartado Plane_state del RamSeries. Cabe destacar que el software GiD tiene por defecto el estado de tensión plana y que, por tanto, para resolver este ejercicio se ha seleccionado el apartado de deformación plana.

Al acabar este primer paso del estudio, se procede a la comprobación de los resultados mediante un modelo 3D. Para este apartado se da uso al complemento 3D_Solids del RamSeries dando así un grado más de libertad al problema. De esta forma, el PTV para el análisis 3D queda así:

$$\iiint_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \iiint_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} dV + \iint_A \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} dA + \sum_{i=1}^n \delta \mathbf{u}_i^T \mathbf{p}_i$$

Como se puede observar se ha aumentado una dimensión al problema lo que, junto al mayor tamaño del modelo, supone un incremento del coste computacional de este.

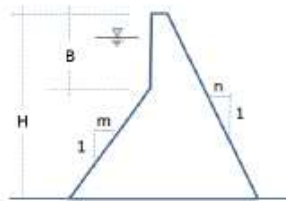
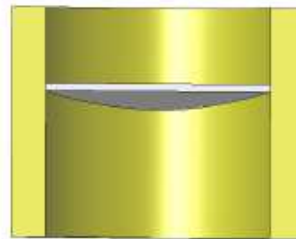
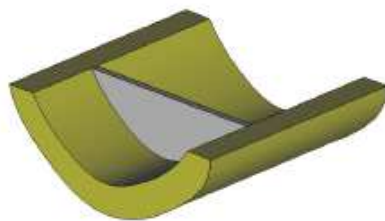
Siguiendo las directrices del enunciado, el problema debe cumplir las siguientes restricciones:

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la presa no deben superar 0,15 MPa
- 2) El peso específico del hormigón es de 25000 N/m³ y del terreno es de 20000 N/m³
- 3) El Módulo de elasticidad del hormigón a usar es de 22 G N/m² y el coeficiente de poisson es de 0,20
- 4) Base empotrada en el terreno
- 5) Cimentación en terreno homogéneo. Módulo de elasticidad: 37 G N/m² y coeficiente de poisson 0,30.
- 6) Cargas actuantes:
 - a) Peso propio
 - b) Peso propio + empuje hidrostático en presa y cimentación (altura del agua 46 metros)

El perfil del emplazamiento es el que se muestra:



La sección de terreno tiene un ancho de 30 metros y un desarrollo de 200 metros.



$$\begin{aligned}
 2.0 < m < 4.0 \\
 2.0 < n < 3.5 \\
 0.1 H < B < 0.3 H
 \end{aligned}$$

Como se puede observar en la imagen superior, los únicos parámetros que no define el enunciado son los dos pendientes de la presa n y m , ni la altura B . Para este ejercicio se han tomado los siguientes valores:

$$n = 3.5m$$

$$m = 2m$$

$$B = 9.6m$$

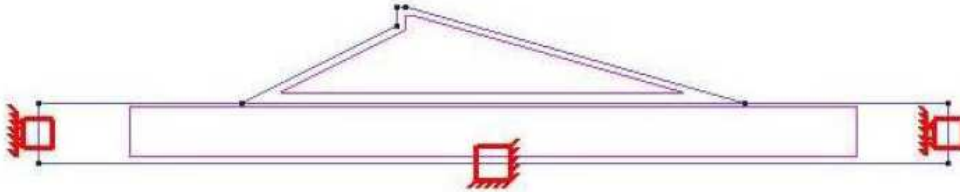
2. Análisis 2D

2.1. Pre-proceso

2.1.1. Geometría y condiciones de contorno

El primer paso a seguir es generar el modelo mediante las restricciones impuestas por el enunciado. Además, cabe destacar que este modelo queda dividido en dos superficies, la de la presa y la del terreno.

Por otro lado, la superficie del terreno se considera empotrada es decir, los desplazamientos en la base según los ejes X e Y quedan impedidos mientras que en los laterales solamente se impiden los desplazamientos en el eje X. La siguiente imagen muestra cómo queda el modelo después de imponer la geometría y las condiciones de contorno:

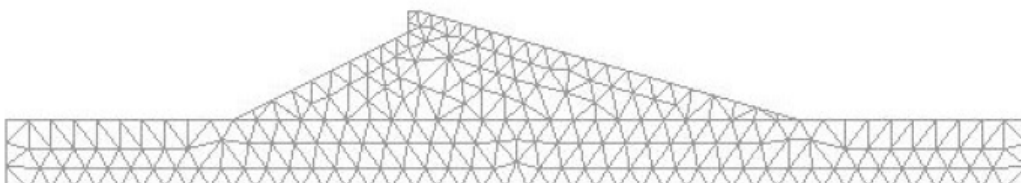


2.1.2. Cargas actuantes

Tal y como pide el enunciado, hay dos casos de carga a tratar. Por un lado un caso de carga en el que únicamente se tienen en cuenta los pesos propios de las dos superficies. Y, por otro lado, otro caso de carga en el que no solamente se tiene en cuenta el peso propio sino que también se considera el empuje hidrostático de la columna de agua de 46 metros que soporta la presa. Tomando 10m/s^2 como el valor de la gravedad y un peso específico del agua de 1000 kg/m^3 , el empuje en el pie de la presa será de 460kN/m^2 . Cabe destacar que este empuje del agua actúa uniformemente sobre el terreno mientras que sobre la presa es una carga lineal en que la acción del agua incrementa a medida que aumenta la profundidad.

2.1.3. Mallado

Debido a la geometría del problema se ha decidido hacer el modelo con elementos de mallado triangulares de 6 nodos. Esto es debido a que los elementos triangulares de 3 nodos son menos precisos que los cuadriláteros o los elementos triangulares de mayor orden y, por qué el modelo a estudiar presenta muchos ángulos y cambios en la geometría, impidiendo así el correcto funcionamiento de un mallado con elementos cuadriláteros. Por lo tanto, el modelo queda discretizado de la siguiente forma:



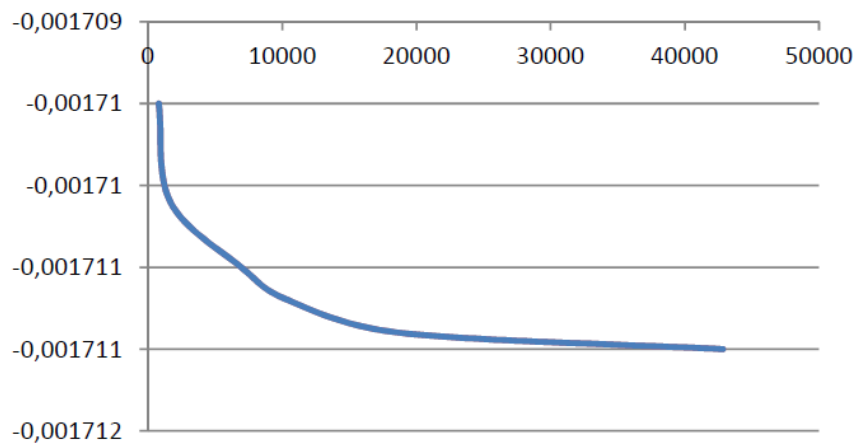
2.2. Post.-proceso

2.2.1. Primer caso de cargas: Peso propio

Igual que a lo largo de las prácticas realizadas durante el curso, el primer paso es determinar los grados de libertad necesarios para que la solución converja. La siguiente tabla muestra el análisis de convergencia realizado:

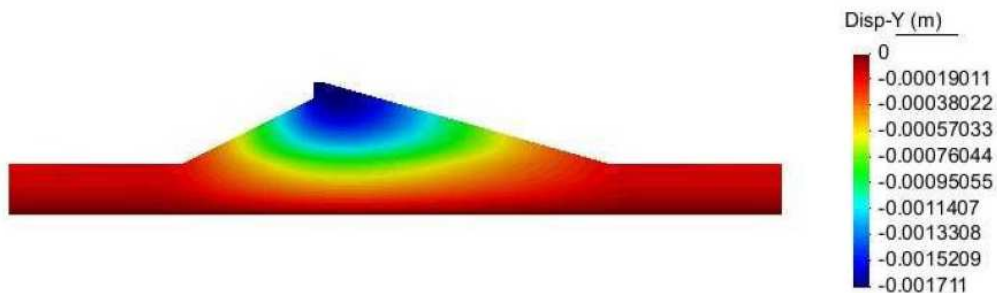
GL	Despl.Y máximo (m)
792	-0.0017095
1640	-0.0017102
6942	-0.0017101
10420	-0.0017103
18762	-0.0017108
42838	-0.001711

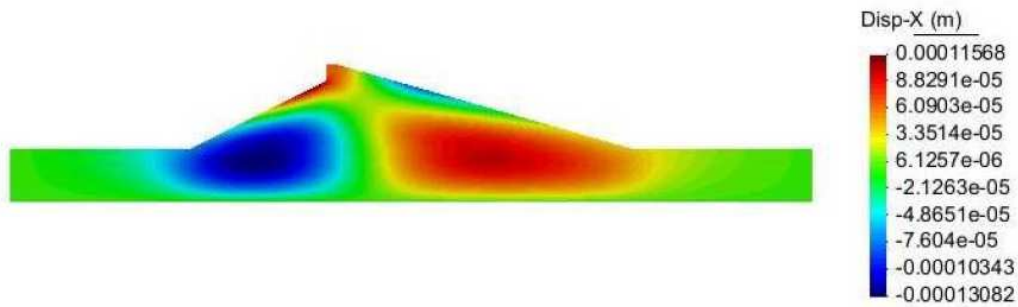
La representación gráfica de dicho análisis de convergencia es la siguiente:



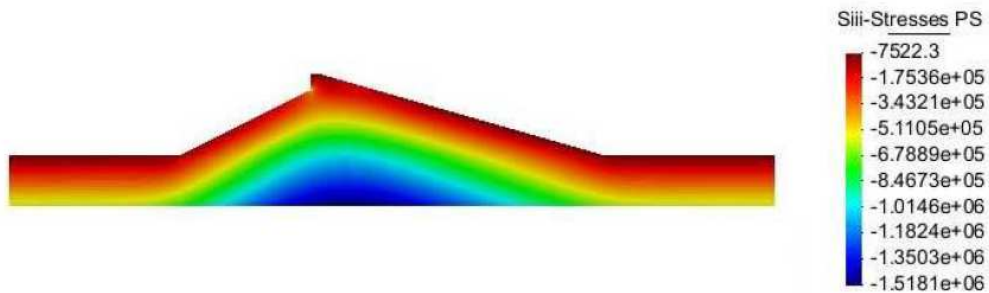
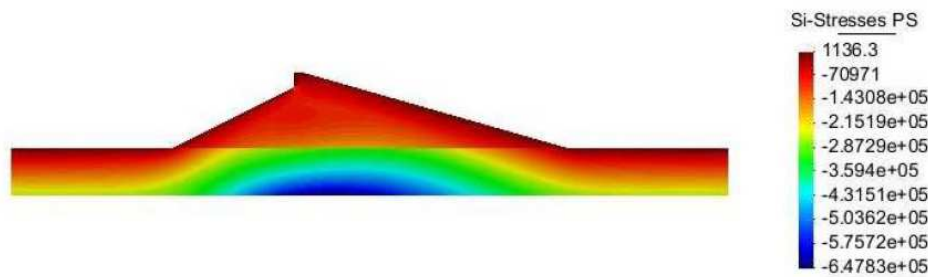
Tal y como podemos observar, a partir del mallado de 18762 nodos la solución ya empieza a converger. Aún así, dado que este es un ejercicio teórico y buscamos la máxima precisión, se dará uso del mallado de 42838 para resolver el modelo. Las siguientes imágenes muestran los resultados en el campo de desplazamientos y tensiones usando este mallado:

Desplazamientos en el eje Y e X:





Estado tensional



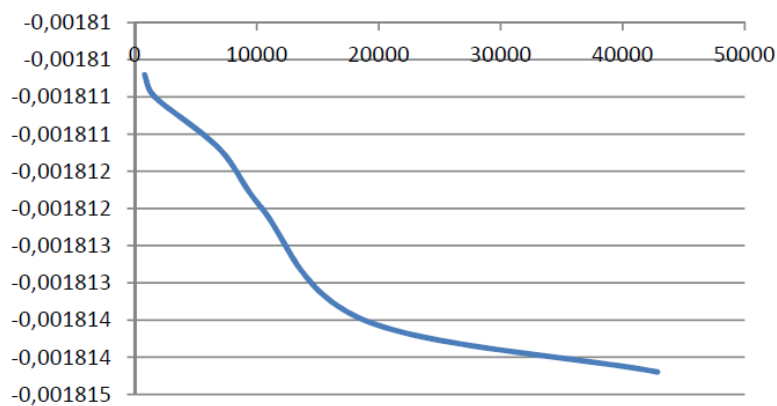
Tal y como era de esperar gracias al análisis de convergencia, el máximo valor de asiento es de 0.001711m y se da en la coronación de la presa. Además, un indicador de que el modelo se ha realizado correctamente es que la parte inferior del terreno que solamente está sometida a la acción del peso propio da un valor de compresión de alrededor de 600kPa ya que el peso específico que se ha definido para el terreno ha sido de 20kN/m³ y hay un espesor de 30m.

Finalmente, también satisface la condición inicial del modelo de no superar los 0.15MPa de tracción ya que toda la pesa se encuentra en compresión.

2.2.2. Segundo caso de carga: Peso propio + Acción del agua (empuje hidrostático)

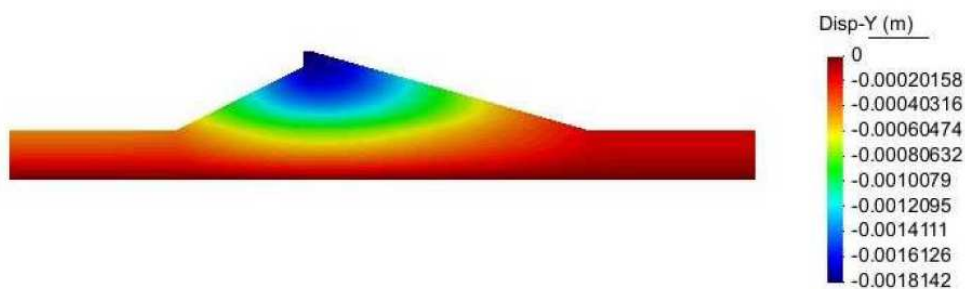
Ídem que en el primer caso, se procede a realizar el análisis de convergencia y se obtienen los siguientes resultados:

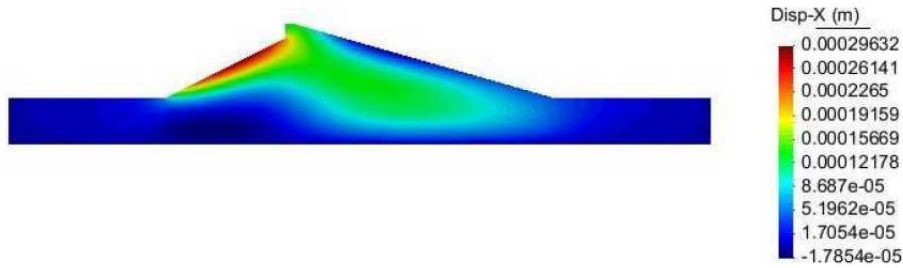
GL	Despl.Y máximo (m)
792	-0.0018102
1640	-0.0018105
6942	-0.0018112
10420	-0.001812
18762	-0.0018135
42838	-0.0018142



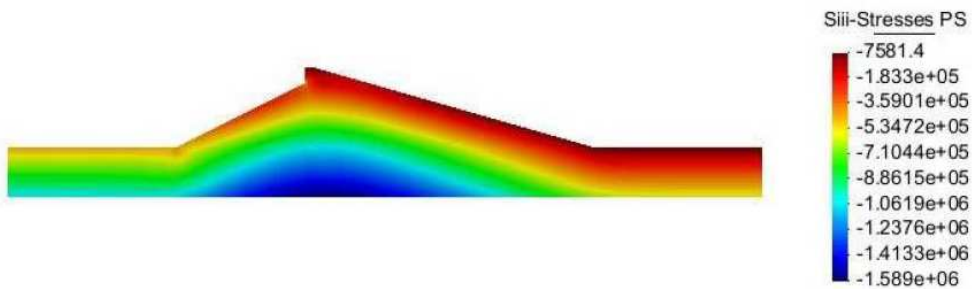
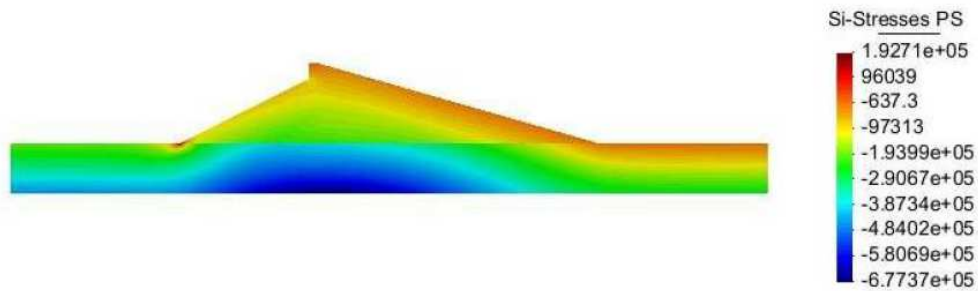
Comparando los dos gráficos de convergencia obtenidos podemos ver que en este segundo caso la convergencia no es tan clara como en el primer caso de carga. Aún así, igual que en el caso anterior, el punto de inflexión se halla a partir del mallado de 18762 y, siguiendo el mismo criterio que antes, utilizaremos la malla con mayor número de elementos para obtener una mayor precisión aunque suponga un mayor coste computacional, es decir, se realizará el análisis con la malla de 42838. . Las siguientes imágenes muestran los resultados en el campo de desplazamientos y tensiones usando este mallado:

Desplazamientos en el eje Y e X:





Estado tensional



Añadiendo en este caso de carga respecto al primero la acción del agua podemos ver que el asentamiento máximo de la presa varía muy poco pasando de los 0.0017m anteriores a 0.0018m.

Cabe destacar que, respecto al estado tensional, las dos zonas superficiales del terreno que se hayan con tracciones muy altas concentradas en el cambio de inclinación se debe a errores locales por culpa de la geometría de esa zona (falta de suavidad en el cambio de inclinación) y podemos despreciar esos valores ya que esos resultados se alejan de la realidad. De esta forma, esos picos se descartan como válidos y se toma como valor de referencia los valores próximos a ellos que, como podemos ver son compresiones y, por lo tanto, el valor restringido de 0.15MPa de tracción se sigue verificando.

2.3. Conclusiones

Para concluir el apartado del análisis bidimensional se puede decir que, a grandes rasgos, la aplicación de la hipótesis de deformación plana junto con la resolución mediante los MEF es una forma rápida y eficiente de solucionar el problema. Cabe destacar que aunque se hayan utilizado los elementos que mejor se adapten a la geometría (triángulos de 6 nodos) este

método puede llevar a errores como el que se ha visto anteriormente por la falta de suavidad entre los cambios de plano y, consiguientemente la aparición de tensiones ficticias. Es por eso que hay que tener cuidado al aplicar este método.

Finalmente, cabe destacar que los resultados obtenidos se ajustan a la realidad y a lo que se esperaba obtener. Ya sea el valor de la compresión del terreno debido a su propio peso o al incremento de compresión que conlleva la columna de agua al terreno.

3. Análisis 3D

3.1. Preámbulo

Tal y como pide el enunciado, el estudio tridimensional de la presa servirá para verificar los resultados obtenidos gracias a la simplificación en 2D y la hipótesis de deformación plana. Este modelo conlleva una mayor complejidad no solamente por la propia geometría del modelo sino por qué se añade una nueva dimensión al análisis numérico (PTV).

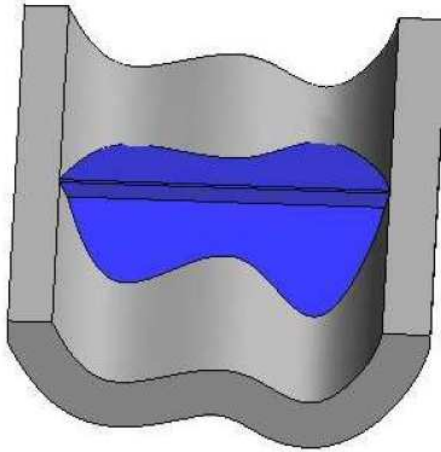
3.2. Pre-proceso

3.2.1. Geometría y condiciones de contorno

Para realizar el modelo se utilizan las herramientas del software GiD de dibujo bidimensional en el espacio XYZ además de las herramientas que permiten extruir e intersecar los diferentes cuerpos (terreno y presa). El proceso de realización del modelo ha seguido los siguientes pasos:

- Generar el perfil del terreno, seguidamente darle volumen
- Generar la presa
- Extruir la presa de forma que interseque con el terreno
- Aplicación de las condiciones de contorno (ídem que en el caso 2D, fijar la superficie inferior del terreno y sus extremos)

Cabe destacar que para la realización de la intersección presa terreno se deben definir las curvas de intersección entre ellas junto con las superficies que crea esta intersección. La siguiente imagen muestra el resultado después de completar los pasos comentados anteriormente:



3.2.2. Cargas actuantes

Para llevar a cabo la verificación de los resultados del análisis 2D se deben verificar los dos casos tratados en ese apartado, el primer caso de peso propio y el segundo caso de carga de peso propio más el empuje hidrostático del agua. Cabe destacar que en el software GiD la aplicación del primer caso de carga sigue el mismo proceso y, para la aplicación del segundo hay una extensión del RamSeries que permite introducir la acción del agua simplemente introduciendo el valor de la cota de la lámina de agua, es decir, 46 metros.

3.2.3. Mallado

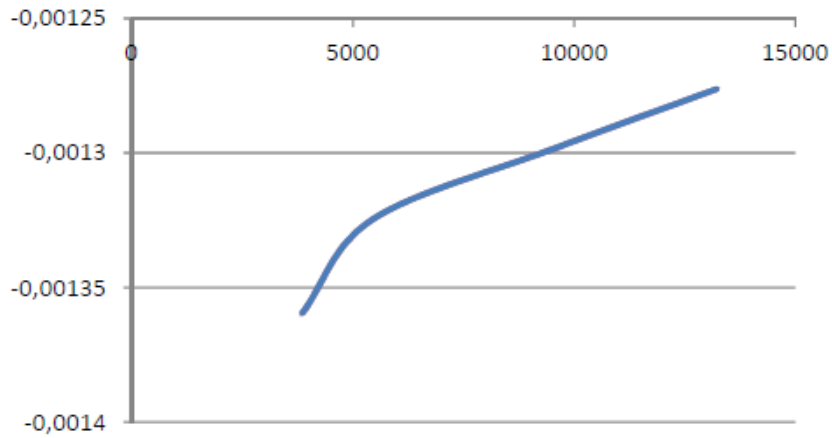
Para la discretización de este modelo se ha utilizado elementos tetraédricos de 4 nodos ya que son los que mejor se adaptan a la complejidad de la geometría. Además, igual que para el caso anterior, se ha realizado un análisis de convergencia de la malla para determinar la malla más adecuada para el modelo. Cabe destacar que al estar tratando un modelo 3D los grados de libertad son 3 veces el número de nodos del modelo.

3.3. Post-proceso

3.3.1. Primer caso: Peso propio

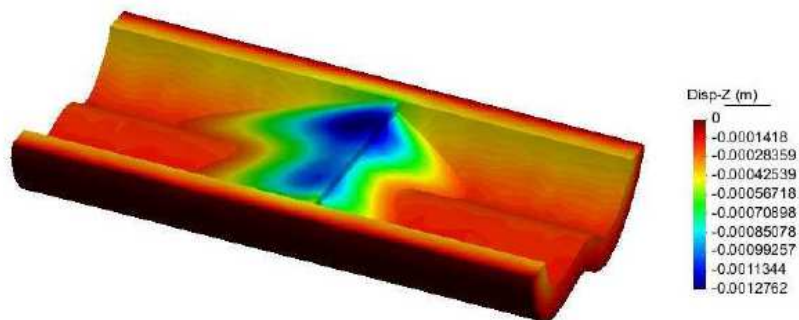
El análisis de convergencia para este primer caso de carga da los siguientes resultados:

GL	Despl. Z máximo
3846	-0.0013597
5454	-0.0013246
9588	-0.0012981
13227	-0.0012762

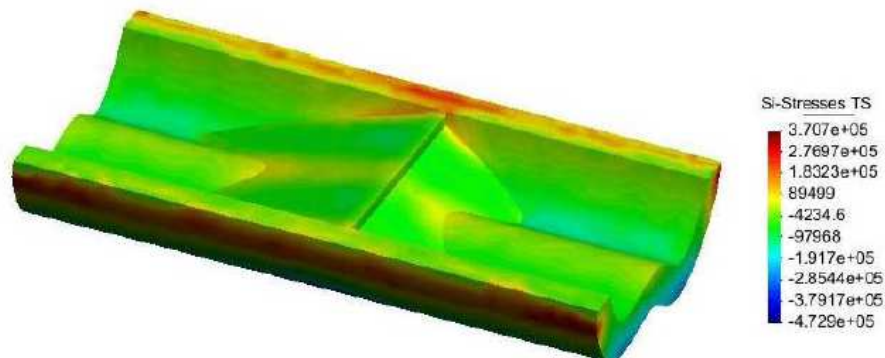


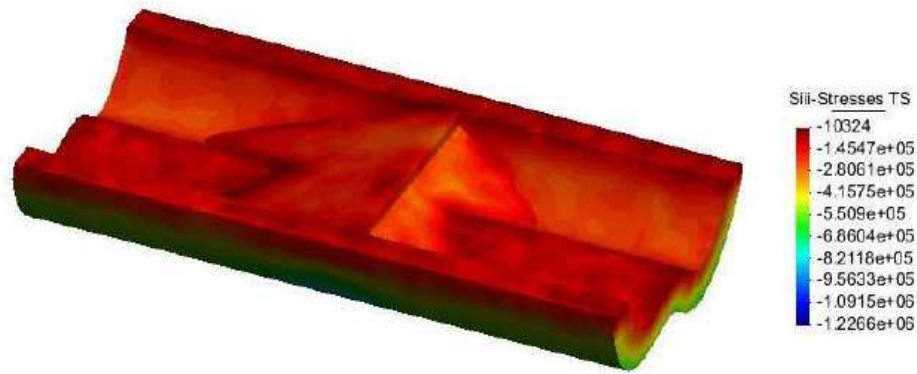
Es fácil observar que la convergencia de resultados no es muy precisa, esto se debe al amplio tamaño del modelo y a la falta de un procesador más potente que pueda refinar bien las mallas con elementos pequeños. De toda manera podemos ver el punto de inflexión al llegar al mallado de 5454 grados de libertad y que el desplazamiento máximo tiende a los 0.00128m. Las siguientes imágenes muestran los resultados tanto en el campo de desplazamientos como en el de tensiones para este modelo:

Desplazamientos en el eje Z



Estado tensional





Como se puede observar en el campo de desplazamientos, el máximo desplazamiento sigue estando en la coronación de la presa aunque en este caso se ha reducido de los 0.0017m del modelo 2D a 0.0013m. Este resultado era de esperar puesto que en el análisis 2D no se estudiaba la sección del valle sino que solamente se tenía en cuenta la sección de la presa y, en cambio, en este modelo 3D sí se ha tenido en cuenta. Resultando el relieve del valle una ayuda para disminuir el asiento ya que en la parte central disminuye la cantidad de hormigón de la presa y, este tiene un peso específico mayor.

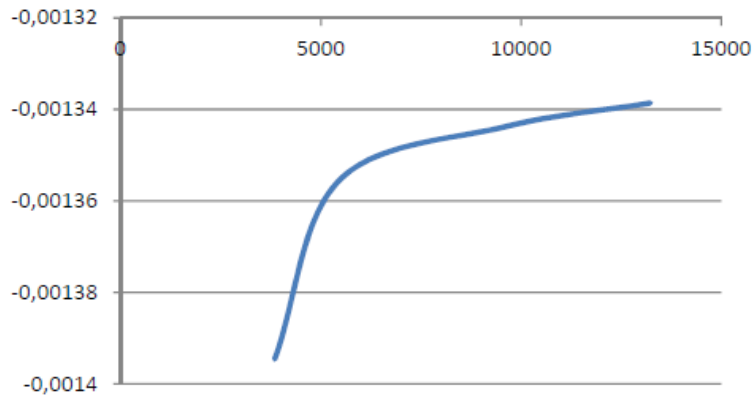
Igual que en el modelo 2D, la presa está sometida a compresiones y por tanto el límite de 0.15MPa de tracciones no se supera. Comentar igual que en el caso 2D que las tracciones localizadas en los extremos del terreno son debidas a fenómenos locales ficticios y, por lo tanto despreciables, y que, de esta forma, también podemos confirmar que el terreno no supera el límite de los 0.15MPa.

Cabe destacar que igual que se hizo para el caso 2D, también se ha comprobado que las tensiones en la base del terreno sean iguales a 600kPa como indicador de que el modelo se ha definido correctamente.

3.3.2. Segundo caso: Peso propio + Acción del agua (empuje hidrostático)

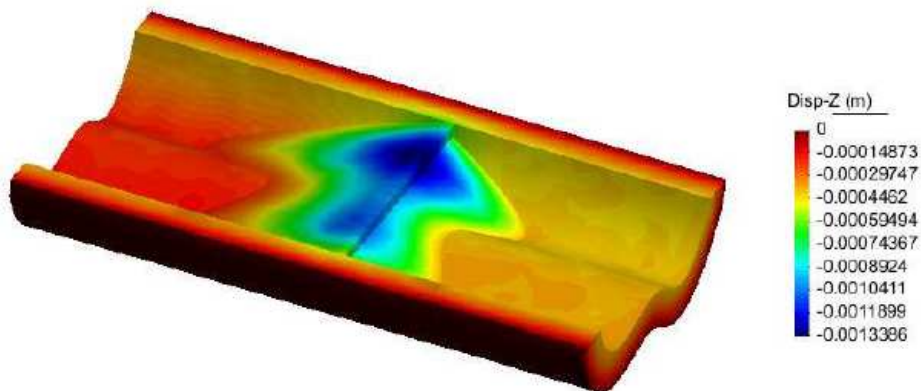
El análisis de convergencia para este nuevo caso de carga da los siguientes resultados:

GL	Despl. Z máximo
3846	-0.0013946
5454	-0.0013555
9588	-0.0013438
13227	-0.0013386

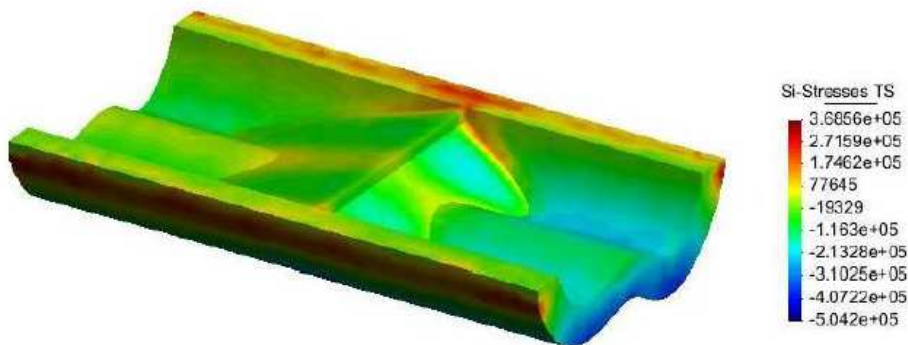


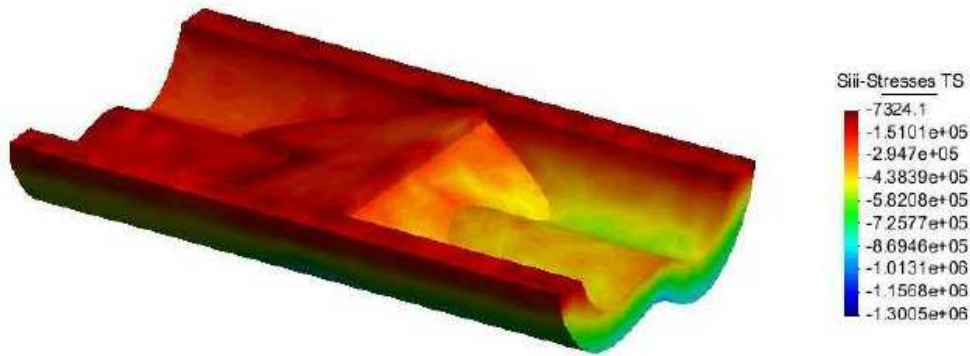
Ídem que para el análisis de convergencia anterior, la convergencia de resultados no es muy precisa y esto se debe al amplio tamaño del modelo y a la falta de un procesador más potente que pueda refinar bien las mallas con elementos pequeños. De toda manera podemos ver que, igual que para el primer caso de carga, el punto de inflexión se da al llegar al mallado de 5454 grados de libertad y que, el desplazamiento máximo tiende a los 0.00134m. Las siguientes imágenes muestran los resultados tanto en el campo de desplazamientos como en el de tensiones para este modelo:

Desplazamientos en el eje Z



Estado tensional





Podemos observar que, igual que en el caso 2D, al tener en cuenta la acción del agua el asentamiento aumenta, en este caso pasando de 0.00127 a 0.00134 e, igual que en el primer caso de carga, también se ha reducido el valor del asentamiento debido a que en el modelo 3D se tiene en cuenta la forma del valle pasando de un asentamiento de 0.0018m en el caso 2D a un asentamiento de 0.00134m como hemos dicho anteriormente.

4. Conclusiones

En primer lugar, podemos concluir que aunque los resultados entre ambos modelos (2D y 3D) no sean exactamente iguales, la aproximación del modelo mediante la hipótesis de deformación plana es correcta ya que el error entre los resultados es muy pequeño y el ahorro de coste computacional y tiempo de modelización es muy grande. Además, cabe destacar que esta aproximación nos deja del lado de la seguridad ya que nos da asientos mayores.

En segundo lugar, comparando las convergencias entre ambos tipos de resolución del problema podemos decir que la convergencia del modelo 2D es mejor ya que se ve la tendencia a un valor. Como se ha comentado anteriormente, esto es debido al gran tamaño del modelo 3D y a la incapacidad de refinar correctamente las mallas tan finas por el procesador.

Por último, comentar también un hecho que se ha visto a lo largo de todo el proyecto y es que aunque la resolución por MEF sea muy eficaz, hay que tener cuidado ya que no es fiable a ojos ciegos. En nuestro caso, los cambios bruscos entre planos han generado tensiones ficticias en el modelo.

Referencias

- Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Eugenio Oñate. CIMNE, Barcelona 2016
- GiD reference manual (Online Version).
“<https://www.gidhome.com/documents/referencemanual/Tabla%20de%20Contenidos>”